

2 Pulverbettbasierte laseradditive Fertigung

Im Folgenden wird der Stand der Technik der pulverbettbasierten laseradditiven Fertigung zusammengefasst und von verwandten additiven Fertigungsverfahren abgegrenzt. Dazu werden das Technologieprinzip und der Fertigungsprozess detailliert beschrieben und relevante Stellgrößen des Prozesses identifiziert. Anschließend wird das Eigenschaftsprofil laseradditiv gefertigter Bauteile anhand von identifizierten Qualitätsmerkmalen dargestellt. Alternative additive Fertigungsverfahren metallischer und synthetischer Werkstoffe wie das Auftragsschweißen [39], [49], [56], das Elektronenstrahlschweißen [67], [53], das Fused Deposition Modeling [131] oder das Lasersintern [8], [80], die für diese Arbeit nicht von Interesse sind, werden in der entsprechenden Fachliteratur detailliert beschrieben.

2.1 Verfahrensdefinition

Der Begriff der additiven Fertigung vereint alle Verfahren zur Herstellung von physischen Bauteilen mittels eines zyklischen, schichtweisen Aufbaus. Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Fertigung von Prototypen, Funktionsmustern, Werkzeugen sowie funktionellen Serienbauteilen und sind auch unter dem Begriff der Rapid Technologien bekannt [38], [120]. Die Abgrenzung der einzelnen additiven Fertigungsverfahren untereinander erfolgt einerseits durch den verwendeten Werkstoff, seiner Konstitution im Ausgangszustand und dem eingesetzten Auftragsmechanismus des Werkstoffs sowie andererseits durch das Wirkprinzip zum Verbinden der einzelnen Schichten. Eine Beschreibung der unterschiedlichen Verfahrensprinzipien findet sich in der VDI Richtlinie 3404 *Generative Fertigungsverfahren* [120]. Durch steigende Präsenz der additiven Fertigung in den Medien etabliert sich in der breiten Öffentlichkeit der Begriff des 3D-Drucks zunehmend als Synonym für eine Vielzahl additiver Fertigungsverfahren [37], [115], [116], [119].

Ein Verfahren der additiven Fertigung ist die pulverbettbasierte laseradditive Fertigung, die in dieser Arbeit zur Herstellung des Versuchswerkstoffs aus der Titanlegierung TiAl6V4 genutzt wird. Dabei wird das Bauteil aus Pulverwerkstoff unter Einsatz von Laserstrahlung als Energiequelle in einer geschlossenen Baukammer schichtweise aufgeschmolzen. Der Auftrag des Pulverwerkstoffs erfolgt mittels einer Beschichtungseinheit ganzflächig in der Baukammer. In der Industrie und Wissenschaft existiert eine Vielzahl von Bezeichnungen für dieses Verfahrensprinzip. Zum einen werben die Anlagenhersteller mit geschützten Markennamen, wie Selective Laser Melting (SLM) [107], Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [34], Direct Metal Printing (DMP) [1] und Laser Cusing [18]. Zum anderen finden sich unterschiedlichste Begriffe für das Verfahren in wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Häufig verwendete Begriffe für die pulverbettbasierte laseradditive Fertigung sind dabei vor allem Laserformen [133], Lasergenerieren [90], Laser Freeform Fabrication [92], Laser Melting [104] und

Laserstrahlschmelzen [121]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff der laseradditiven Fertigung synonym für die pulverbettbasierte laseradditive Fertigung metallischer Werkstoffe verwendet.

2.2 Technologieprinzip der laseradditiven Fertigung

Die Prozessschritte der laseradditiven Fertigung sind in Abbildung 2.1 dargestellt und werden im industriellen Einsatz in die innerbetriebliche Produktion als eine in sich abgeschlossene Prozesskette eingebunden [38]. Alle Schritte werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

Ausgangspunkt ist stets ein 3D-CAD-Modell des zu fertigenden Bauteils. Dieses kann konventionell mit CAD-Software konstruiert oder mittels Reverse Engineering durch taktile oder optische Messverfahren gewonnen werden [38]. Die 3D-CAD-Daten müssen zur weiteren Verarbeitung in der prozess- und maschinenspezifischen Software zunächst in das STL-Format (Standard Tessellation Language) überführt werden. Dabei wird die Oberfläche des Bauteils mit dreieckigen Oberflächenelementen approximiert. In einem nächsten Schritt wird das Bauteil virtuell in der Baukammer positioniert, orientiert und mit Stützstrukturen, sogenannten Supports, an die Bauplattform der Maschine angebunden (vgl. Abbildung 2.2). Die Stützstrukturen unterbinden ein Ablösen und Aufwölben des Bauteils durch die im Fertigungsprozess entstehenden Eigenspannungen [76]. Im Anschluss wird das Modell in horizontale Schichten entsprechend der Fertigungsschichtdicke unterteilt. Dieser Prozessschritt wird als Slicen bezeichnet und bildet das Bauteil durch einzelne zweidimensionale Konturen ab. Durch die Zuweisung einer konstanten Schichtstärke zu jeder einzelnen Kontur werden zwei-ein-halb-dimensionale Schichtinformationen des gesamten Bauteils erzeugt. Im nächsten Schritt, dem sogenannten Hatchen, werden den einzelnen Schichten die Belichtungsvektoren des Lasers, gemäß den zuvor definierten Prozessparametern zugewiesen. Anhand der so erzeugten Fertigungsdaten wird das Bauteil im Fertigungsprozess schichtweise aufgebaut.

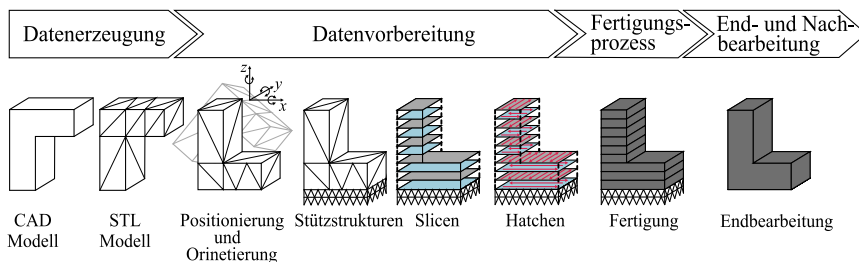


Abbildung 2.1: Prozesskette der laseradditiven Fertigung

Für den Fertigungsprozess wird die Bauplattform oder Substratplatte, auf der das Bauteil additiv gefertigt wird, auf dem Hubtisch montiert und horizontal ausgerichtet. Nach dem Verschluss der Baukammer wird diese mit Inertgas geflutet, um Reaktionen des Pulverwerkstoffes sowie der im Fertigungsprozess entstehenden Schmelze mit der Umgebungsluft zu verhindern. Je nach verwendetem Pulverwerkstoff wird Argon, Stickstoff oder Helium als Schutzgas im Prozess eingesetzt. Nach der vollständigen Flutung der Prozesskammer wird der Hubtisch um eine Schichtstärke herabgesenkt und die erste Pulverschicht aufgetragen. Abhängig von Maschinentyp und Werkstoff kommen unterschiedliche Beschichtungsmechanismen wie Rollen oder starre und flexible Klingen zum Einsatz, um eine gleichmäßige Beschichtung und Nivellierung des Pulvers über die gesamte Substratplatte zu erzielen. Die Bereitstellung des dafür notwendigen Pulvers erfolgt aus einem Reservoir, welches mit Neupulver oder recyceltem Pulver gefüllt wird.

Im Anschluss an diese vorbereitenden Tätigkeiten wird in einem ersten Fertigungsschritt das Metallpulver entlang der in der Datenvorbereitung erzeugten Vektoren für die erste Schicht aufgeschmolzen. Dafür wird der Laserstrahl durch eine Spiegel-Ablenkeinheit in der xy -Ebene über das Pulverbett bewegt und mit Hilfe optischer Komponenten so geformt und fokussiert, dass die Laserstrahlenergie das Pulver selektiv aufschmilzt. Es wird genau so viel Energie eingebracht, dass das Metallpulver vollständig aufschmilzt und mit der darunter liegenden Substratplattform eine metallurgische Bindung eingeht. Nach vollständiger Bearbeitung der ersten Schicht wird im zweiten Schritt der Hubtisch wiederum um eine Schichtdicke abgesenkt und im darauf folgenden Schritt eine neue Pulverschicht aufgezogen. Der zyklische Prozess beginnt erneut mit dem Aufschmelzen der nächsten Schicht und wird bis zur vollständigen Fertigstellung des Bauteils fortgeführt. Nach Beendigung des Fertigungsprozesses kann das Bauteil aus der Baukammer entnommen werden. Im Prozess nicht aufgeschmolzenes Pulver wird gesiebt und dem Folgeprozess als recyceltes Pulver wieder zugeführt. Im Anschluss an die Fertigung sind je nach Anforderungen an das Bauteil weitere Nachbearbeitungsschritte wie z.B. Spannungsarmglühen, das Trennen von der Substratplatte und das Entfernen der Supportstrukturen notwendig.

Für eine detailliertere Beschreibung der verfügbaren Bauraumgrößen, Strahlquellen und optischen Komponenten zur Strahlführung und -formung kommerzieller Anlagentechnik wird an dieser Stelle auf die Anlagenhersteller 3D Systems Corporation [1], Concept Laser GmbH [18], EOS Electro Optical Systems GmbH [34], Matsuura Machinery Corporation [70], Realizer GmbH [91], Renishaw PLC [94], Sisma SpA [105] und SLM Solutions GmbH [107] verwiesen.

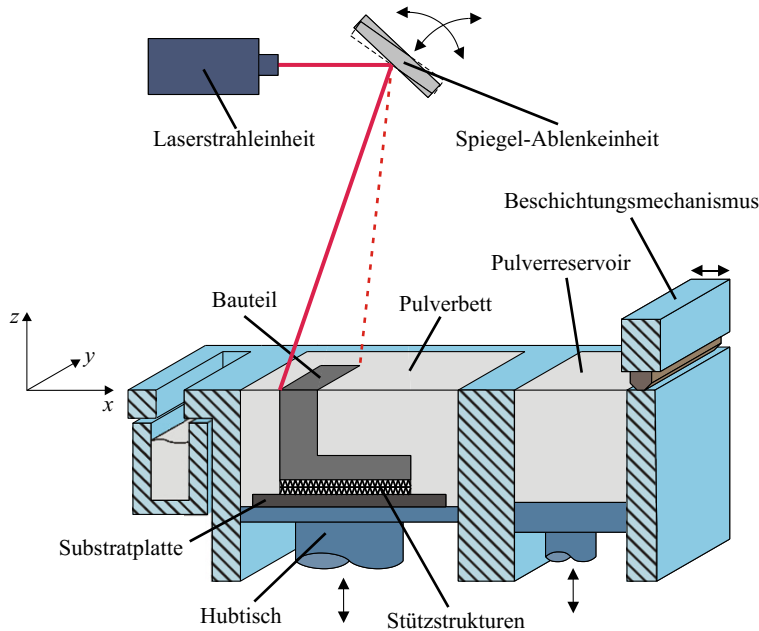


Abbildung 2.2: Technologieprinzip der laseradditiven Fertigung

2.3 Dominante Stellgrößen des Fertigungsprozesses

Die Fertigung qualitativ hochwertiger Strukturbauteile mittels additiver Fertigung erfordert eine stabile Prozessführung, bei der alle Stellgrößen in einem definierten Varianzbereich gehalten und Störgrößen weitestgehend eliminiert werden müssen. Für die laseradditive Fertigung konnten mehr als 100 dieser Stell- und Störgrößen identifiziert werden [36], [92], [103], [128]. Die dominanten Einflussparameter lassen sich jedoch auf einige wenige Stellgrößen [72], [85], [92], [144] und Störgrößen reduzieren [93].

Dominante Störgrößen wie schlechte Werkstoffqualität, ein unzureichender Wartungszustand der Maschine und mangelnde Kenntnisse des Bedieners führen zu einer Varianz in der Bauteilqualität [92] und können durch Eingangsqualitätskontrollen des Werkstoffs, regelmäßige Maschinenwartung und -instandhaltung sowie Personalschulungen minimiert werden.

Als dominante Stellgrößen wurden die Schichtstärke D_S , die Laserleistung P_L , der Spurbabstand h_S , auch Hatchabstand genannt, und die Belichtungsgeschwindigkeit v_S identifiziert. Ihr Zusammenspiel bestimmt maßgeblich die Dichte des Bauteils und damit weitere Qualitätseigenschaften wie Härte und Festigkeit [72], [92]. In Abbildung 2.3 sind die dominanten Stellgrößen in einem Prozessschaubild grafisch dargestellt.

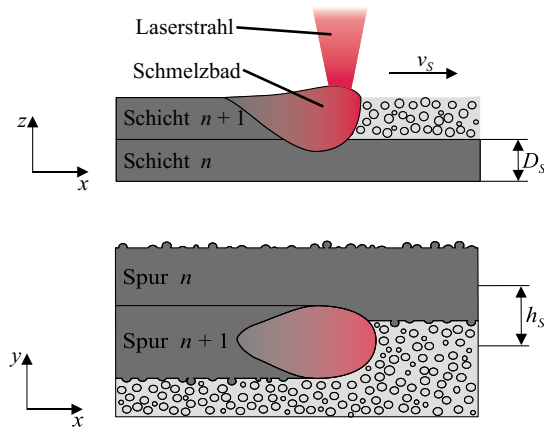


Abbildung 2.3: Stellgrößen und Fertigungsprinzip der laseradditiven Fertigung

Eine Dichte größer als 99% der theoretisch maximalen Dichte und damit eine vergleichbare Qualität zu konventionell gefertigten Werkstoffen mittels Walzen oder Guss wird nur durch vollständiges Aufschmelzen des Pulverwerkstoffs und Verschmelzen der einzelnen Schweißbahnen und Schichten untereinander gewährleistet. Die dafür benötigte Volumenenergiedichte E_V berechnet sich nach Meiners [72] folgendermaßen

$$E_V = \frac{P_L}{D_s \cdot h_s \cdot v_s} \quad (2.1)$$

Prozessinstabilitäten, die zu Porosität und Prozessfehlern führen, treten sowohl durch einen zu geringen als auch durch einen zu hohen Energieeintrag im Prozess auf. Bei einem zu geringen Energieeintrag wird das Pulver nicht vollständig aufgeschmolzen. Außerdem besitzt die Schmelze bei geringem Energieeintrag eine erhöhte Viskosität und eine daraus resultierende erhöhte Oberflächenspannung. Die Schmelze nimmt aufgrund der Oberflächenspannung die energetisch günstigste Form an und bildet einzelne sphärische Strukturen aus, in denen sie erstarrt. Es erfolgt keine vollständige Benetzung der Oberfläche durch die Schmelze und somit wird keine vollständige metallurgische Verbindung zwischen den einzelnen Schweißbahnen und Schichten erzeugt [72].

Zu hohe Energieeinträge hingegen können zur lokalen Verdampfung des Materials und damit zur Spritzerbildung beitragen [72]. Bei der Verdampfung wird Material aus dem Schmelzbad durch den abströmenden Metalldampf mitgerissen und bildet sphärische Partikel mit bis zu zehnmal größerem Durchmesser als die Kornfraktion des Pulvermaterials aus. In Ihrem Flug erstarren die Spritzerpartikel und setzen sich im Pulverbett oder auf bereits aufgeschmolzenen Bereichen ab. Beim Aufschmelzen einer neuen Schicht können die Spritzerpartikel das Prozessgleichgewicht durch erhöhten

Energiebedarf zum erneuten Aufschmelzen stören und somit Fehlstellen verursachen oder als Einschlüsse mit im Material verschmolzen werden.

Bei gegebener Laserleistung bestimmt der für einen stabilen Fertigungsprozess benötigte Energieeintrag die maximale Fertigungsgeschwindigkeit und damit die Produktivität. Die theoretische Aufbaurate R berechnet sich aus der Schichtstärke D_S , dem Hatchabstand h_S und der Belichtungsgeschwindigkeit v_S wie folgt

$$R = D_S \cdot h_S \cdot v_S \quad (2.2)$$

Eine Steigerung der Aufbaurate ist, bei konstanter Laserleistung, stets mit einer Minderung der Volumenenergiedichte und damit der Abwägung zwischen einer möglichen Produktivitätssteigerung oder einer geringeren Bauteildichte bzw. –qualität verbunden. Somit wird für eine Steigerung der Produktivität durch höhere Scangeschwindigkeit oder größere Schichtstärken bei gleichbleibender Werkstoffqualität immer eine erhöhte Energiezufuhr vorzugsweise durch erhöhte Laserleistung benötigt.

2.4 Eigenschaftsprofil laseradditiv gefertigter Bauteile

Das Eigenschaftsprofil laseradditiv gefertigter Bauteile resultiert aus den mechanischen Werkstoffkennwerten sowie den geometrischen Bauteileigenschaften. Die Qualität der gefertigten Werkstoffe und der daraus resultierenden Bauteile kann anhand weniger Merkmale charakterisiert werden [72], [93]. Diese Merkmale werden im Folgenden näher erläutert.

Oberflächengüte: Die Oberflächenrauheit laseradditiv gefertigter Bauteile wird durch zwei verfahrensbedingte Phänomene negativ beeinflusst. Zum einen kommt es bei der Zerlegung des Bauteils in horizontale Schichten zu dem so genannten Treppenstufeneffekt. Der Effekt entsteht beim Slicen durch die Annäherung der äußeren dreidimensionalen Bauteilkontur durch die 2½-dimensionalen Schichten [72], [85]. Die Stärke der Ausprägung des Effekts wird dabei in erster Linie durch die minimale Schichtstärke bestimmt. Des Weiteren erzeugen die einzelnen Schweißbahnen, aus denen das Bauteil aufgebaut ist, eine unebene Oberfläche. Diese wird durch das Überlappen einzelner Schweißbahnen an der Bauteiloberfläche sowie durch die Anhaftung einzelner Pulverpartikel an der Bauteilkontur verstärkt [72], [103]. Trotz der starken Fokussierung des Laserstrahls auf Durchmesser von unter 100 µm bewirkt die Wärmeleitung im Pulverwerkstoff das Anschmelzen und Anhaften einzelner Pulverpartikel, die außerhalb der vom Laserstrahl abgefahrenen Bauteilfläche liegen [103], [133]. Die Oberflächenrauheit ist daher vor allem abhängig von der minimalen Schichtstärke, dem Oberflächenwinkel, der Kornfraktion und der Wärmeleitfähigkeit des Pulvermaterials [72].

Eigenspannungen: Eigenspannungen in laseradditiv gefertigten Bauteilen entstehen vergleichbar zum konventionellen Schweißen durch zwei unterschiedliche Effekte im Fertigungsprozess [76]. Zum einen wird durch die Einbringung thermischer Energie eine Ausdehnung des Materials hervorgerufen. Diese führt bei hohem Energieeintrag zur plastischen Verformung des umliegenden Materials. Während des Abkühlens tritt in Bereichen plastischer Verformung eine erhöhte relative Kontraktion auf, die zum Verzug des Bauteils und damit zur Bildung von Zugspannungen beiträgt [76]. Zum anderen erfährt das aufgeschmolzene Material eine Verringerung seines Volumens während des Abkühlens der Schmelze. Die feste schmelzmetallurgische Verbindung der gerade gefertigten abkühlenden Schicht mit der darunterliegenden und bereits erstarrten Schicht verhindert eine freie Kontraktion des Materials und verursacht somit die Entstehung von zweidimensionalen Zugeigenspannungen senkrecht zur Aufbaurichtung [76], [79], [85]. Eine feste Anbindung an die Substratplatte verhindert die Relaxation der Spannungen durch Verformung des Bauteils während des additiven Fertigungsprozesses und erhöht somit die im Material verbleibenden Eigenspannungen. Vor dem Abtrennen des Bauteils von der Substratplatte muss daher zwingend eine Wärmebehandlung zur Relaxation stattfinden, um einen nachträglichen Verzug zu verhindern.

Maßhaltigkeit: Die Maßhaltigkeit laseradditiv gefertigter Bauteile wird durch die Qualität der Geometriedaten, die verwendete Schichtstärke, die Positioniergenauigkeit des Laserfokus mittels der Scannereinheit und durch die im Prozess auftretende Materialschrumpfung sowie den Verzug durch Eigenspannungen bestimmt. Während der Überführung der 3D-CAD-Daten in das STL-Format wird die Oberfläche des Bauteils mit Dreieckselementen angenähert. In Abhängigkeit der gewählten Auflösung und des Algorithmus zur Konvertierung der Daten wird die Maßhaltigkeit des physischen Bauteils zur tatsächlichen Bauteilgeometrie bereits in diesem Verfahrensschritt beeinflusst [38]. Bei der Zerlegung der 3D-Geometrie in einzelne 2½D-Schichten erfolgt eine weitere Approximation der tatsächlichen äußeren Kontur des Bauteils. Die minimale Schichtstärke bestimmt dabei die maximal erreichbare Auflösung in Aufbaurichtung und damit die maximale Geometrietreue in dieser Ausdehnungsrichtung. Die Maßhaltigkeit des Bauteils in der xy -Ebene (vergl. Abbildung 2.2) wird vornehmlich durch die Positionier- und Wiederholgenauigkeit des Scannersystems beeinflusst und liegt bei kommerziellen Systemen bei $\pm 50 \mu\text{m}$ [100]. Weiterhin beeinflussen die Schrumpfung des Materials während der Abkühlung sowie der durch Eigenspannungen entstehende Verzug die Maßhaltigkeit laseradditiv gefertigter Bauteile [76].

Dichte: Die Dichte des Bauteils wird, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, durch die in den Pulverwerkstoff eingekoppelte Energie bestimmt. In Abhängigkeit des Absorptionsgrades und der Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Materials schwankt der Leistungsbedarf zur Fertigung dichter Bauteile stark [16], [144]. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass Dichten von über 99% gegenüber der theoretisch

maximalen Materialdichte mit optimierten Parametersätzen für Stahl-, CoCr- und Aluminium-Legierungen erreicht werden können [17] [72], [85]. Verbleibende Restporosität ist homogen über das Bauteil verteilt und bildet sich typischerweise in einzelnen sphärischen Gaseinschlüssen mit Durchmessern kleiner als 100 µm [72] und flächigen Anbindungsfehlern zwischen einzelnen Schichten aus [133].

Mikrostruktur: Die hohe Abkühlgeschwindigkeit der Schmelze im Fertigungsprozess von bis zu 10^6 K/s bewirkt, dass sich ein sehr feines Gefüge im Material ausbildet [85], [144]. Das Kornwachstum erstreckt sich im Prozess über mehrere Schichten, bevorzugt in Aufbaurichtung z und somit senkrecht zur Bauebene [133] [144]. Abhängig von der verwendeten Legierung können unterschiedliche Gefügezustände im Anschluss an den Fertigungsprozess über Wärmenachbehandlungen wie Lösungsglühen und Auslagern eingestellt werden.

Härte: Die im laseradditiven Fertigungsprozess erzielte Materialhärte entspricht den Werten konventionell hergestellter Materialien der gleichen Legierung [121]. Dabei ist die Makrohärte in erster Linie von der Porosität des Materials und damit von einer optimierten Prozessführung abhängig [140]. Je nach eingesetzter Legierung kann es durch die Kornfeinung im Prozess zu einer erhöhten Mikrohärte gegenüber konventionell gefertigter Legierungen kommen [72] [144]. Mithilfe von Wärmebehandlungen können gewünschte Härtegrade nachträglich eingestellt werden [85], [103], [140].

Festigkeit: Äquivalent zur Härte wird die Festigkeit des Werkstoffs primär von der Mikrostruktur beeinflusst. Laseradditiv gefertigte Werkstoffe weisen daher typischerweise eine hohe Zugfestigkeit bei verringerter Duktilität auf [72], [85]. In Abhängigkeit der Aufbaurichtung des Materials wurde für verschiedene Werkstoffe eine Anisotropie nachgewiesen [17], [71], [72], [103], [133]. Diese wird mit der Bildung von Schichtanbindungsfehlern und Segregationen parallel zur Aufbaurichtung begründet. Die Belastung senkrecht zu diesen Fehlern führt zu einem gestörten Kraftfluss und somit zu frühzeitigem Materialversagen und reduzierter Bruchdehnung [133]. Zusätzlich nimmt die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen, die die Festigkeit mindern, mit der Anzahl der zu bauenden Schichten zu und beeinflusst die Festigkeit senkrecht stehender Proben somit negativ [17], [103].

Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten
Titanlegierung TiAl6V4

Wycisk, E.

2017, XIV, 120 S. 77 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-56059-4